

## A3. Digitale Tonverarbeitung

A3.1 Akustische Grundlagen der Audiotechnik

A3.2 Analoge Audiotechnik

A3.3 Digitale Audiotechnik ←

A3.4 Raumklang

### Literatur:

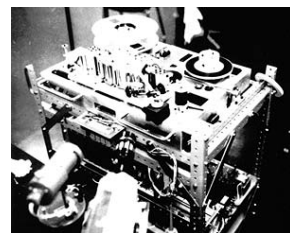
M. Warstat, Th. Görne: Studiotechnik, 5. Auflage, Elektor-Verlag 2002

H. Raffaseder: Audiodesign, Fachbuchverlag Leipzig 2002

B. Katz: Mastering Audio – The Art and The Science,  
Focal Press 2002

## Geschichte der digitalen Audiotechnik

- 1926: Erstes Patent für PCM-Abtastung (P.M. Rainey, Western Electric)
- 1962: PCM-Übertragungssystem (Bell Telephone)
- 1974, Sony: PCM-Audio digital auf Magnetband
- ab 1975: Digitale Masterbänder in Tonstudios
- 1979, Philips: Erste digitale Audiodisc
- 1981, Philips/Sony: Compact Disc (CD)
  - 1988 Verkaufszahlen von CDs über denen von LPs
- 1981: Standardisierung von MIDI (Synthesizer)
- 1990: DAT-Recorder (Digital Audio Tape)
- 1990: CD-R
- 1992: Philips DCC und Sony MiniDisc (MD)
- 1999, Sony/Philips: Super Audio CD (SACD) und Direct Stream Digital
- 1999: DVD-Audio
- 2000+: Direct-to-disc Recording etabliert sich



Sony digital tape recorder 1974



DAT Tape (1990–2005)

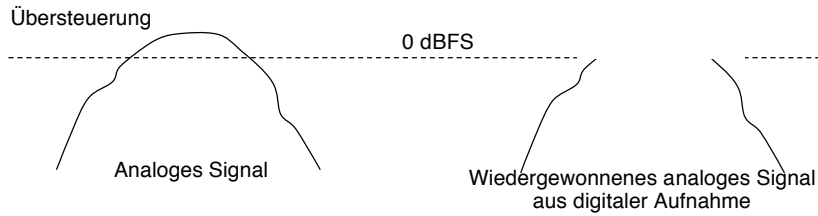
## Analog-/Digital-Wandlung

- Abtastung
  - Diskretisierung (Abtastrate)
  - Quantisierung (Wortlänge)
- Abtastraten:
  - 32 kHz (Broadcast, Semi Professional)
  - 44.1 kHz für CDs, Mastering und Aufzeichnung mit Videogeräten der 625/50 Norm
  - 44.056 kHz für Aufzeichnung mit Videogeräten der 525/59.94 Norm
  - 48 kHz professionelle Studionorm für Recorder mit feststehenden Köpfen
  - 96 kHz High End Mastering, DVD Audio
  - 2.8224 MHz „Direct Stream Digital“ (z.B. für SACD = Super-Audio CD)
- Wortlängen:
  - 16 Bit (Audio-CD)
  - 24 Bit (Mastering)
  - Interne Wortlängen von Bussystemen und Effektgeräten oft höher

## Digitale Pegel

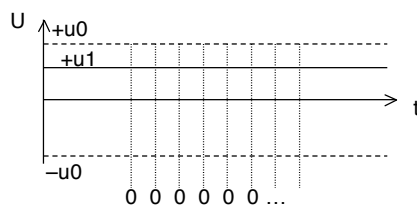
- Maximaler digitaler Audiopegel: 0 dBFS (dB Full Scale)
  - *Maximal* möglicher Wert in der gewählten Quantisierung
  - Prinzipiell unabhängig vom Spannungswert nach Analog-Konversion
  - Alle real auftretenden Pegelwerte sind negativ
- 1 Bit Wortlänge = Verdopplung des Dynamik-Wertebereichs = 6 dB
  - 8 Bit Wortlänge = 48 dB (z.B. 00000000 = -48 dBFS)
  - 16 Bit Wortlänge = 96 dB
  - 24 Bit Wortlänge = 144 dB
- Digitaler Headroom: Differenz zwischen Arbeitspegel und 0 dBFS
  - Mindestens -9 dBFS, oft höherer Abstand vorgeschlagen (z.B. -20 dBFS)
    - » „Intersample Peaks“, optimaler Arbeitsbereich für analoge Verstärker
  - D/A-Wandlerpegel 6 dBu entspricht digitalem Arbeitspegel
- Rauschen in der digitalen Bearbeitung:
  - A/D-Wandler: Rauschen bei ca. -104 dBFS
  - Digitale Mixer: Rauschen bei ca. -120 dBFS

## Digitales „OVER“?

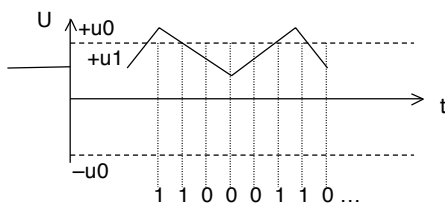


- Signalanteile, die durch Übersteuerung bei der Aufnahme verloren gehen, sind für immer verloren („Clipping“)
  - „OVER“-Anzeige nur bei Aufnahme, nicht bei Wiedergabe!
- Digitales Clipping
  - Akustisch wesentlich unangenehmer als bei analoger Übersteuerung
  - Rechteck-artige Schwingungen
- OVER-Anzeige bei digitalen Peakmetern:
  - Folge von mehreren aufeinander folgenden 0 dBFS-Werten (z.B. 3)

## Audio-Dithering



Annahme: Quantisierungsschwelle bei  $u_0$   
(LSB, Least Significant Bit)  
Konstante Spannung  $u_1$  unterhalb  $u_0$  (z.B.  $u_0/2$ )  
Sampling liefert Null-Werte



Rauschen (Zufallsignal) mit niedriger Amplitude beigemischt  
Sampling liefert zufällige Wertereihe 0 und 1  
*Durchschnitt (bei nachfolgender Glättung) entspricht  $u_1$  !*

- Durch Hinzufügen von Rauschen kann die Auflösung der Digitalisierung gesteigert werden (Dithering)
- Gleichzeitig Quantisierungsverzerrungen reduziert

## Wortlängenmanagement

- Digitale Bearbeitung liefert größere Wortlängen
  - Berechnungsergebnisse in der Signalverarbeitung
- Es ist sinnvoll, mit längeren Wortlängen zu arbeiten
  - Intern in digitalen Audiogeräten
  - In der digitalen Audio-Bearbeitungskette
  - Vermeiden der Akkumulation von Rundungsfehlern!
- Rückführung auf Medienwortlänge (Rundung)
  - In einem einzigen Schritt, nicht mehrfach
  - Am Ende der Bearbeitungskette
  - Meist unter Verwendung von Dithering (Re-Dithering)

## Digitale Audiotechnik

- Klassifikationen digitaler Audiobausteine:
  - Hardware oder Software
    - » Hardware notwendig für A/D- und D/A-Konversion
    - » Hardware sinnvoll bei hohen Anforderungen an Latenzzeit
    - » Hardware-Bedienelemente für Software-Lösungen (z.B. digitales Mischpult)
  - Produktion oder Modifikation
    - » Produktion: Synthesizer, Tongeneratoren, MIDI-Eingabegeräte
    - » Modifikation: Mischung, Filter, Effekte
  - Live oder Postprocessing
    - » Live: Aufnahmestudio, Live-Bühne, Rundfunk
    - » Postprocessing: „offline“ Nachbearbeitung
    - » Hauptunterschied: Latenzzeiten z.B. für Effekt-Rendering

## Soundkarten



- Bestandteile:
  - Digitaler Signal-Prozessor (DSP)
    - » Digital-Analog-Converter (DAC)
    - » Analog-Digital-Converter (ADC)
  - Speicher (z.B. für Wellenformen bei Klangsynthese und als Puffer)
- Anschlüsse:
  - Analoge und digitale Audio-Ein-/Ausgänge
  - MIDI-Ein-/Ausgänge
  - Raumklang- (Surround Sound-)Ausgänge
- Einfache Soundfunktionalität heutzutage meistens "on board"
- Geschichte:
  - Xerox *Alto* Prototyp beherrscht einfache Audio-Verarbeitung (1972)
  - Erster Audio-fähiger Kleincomputer für den Massenmarkt: Apple Macintosh (1982)

## Digitales Mischpult



Digitales Mischpult  
mit eigenem DSP (Digital Sound Processor)



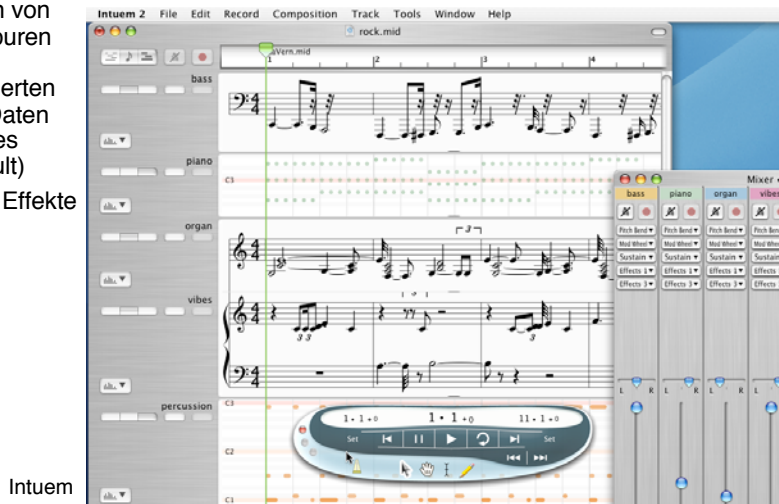
Steuergerät für Software  
(z.B. Cubase, Logic)  
angeschlossen über FireWire



Reine Softwarelösung,  
Steuert u.U. Hardware (z.B. spezielle Soundkarten)

## Software: Sequencer

- Aufnahme und Erstellung (Komposition) von MIDI-Daten
- Mischen von MIDI-Spuren und digitalisierten Audio-Daten (virtuelles Mischpult)
- Digitale Effekte



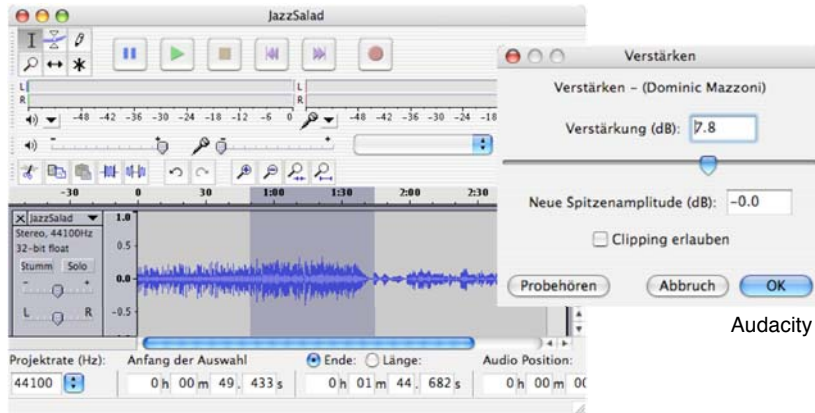
## Software: Audio-Aufnahme



Sound Studio 3

- Zugriff auf Eingabegeräte (Mikrofone, Mischpult)
- Fortschrittsanzeige
- Aussteuerungsanzeige und -Kontrolle
- Speicherung in diversen Formaten
- Oft kombiniert mit anderen Funktionen (z.B. Postprocessing)

## Software: Audio-Bearbeitung



- Import diverser Audio-Formate
- Misch- und Schnittfunktionen
- Nachbearbeitung von Klangspektrum und Pegel
- Anwendung von Audio-Effekten

## Bearbeitung der Amplitude (1)

- Verstärken, Dämpfen, "Normalizing":
  - nachträgliche Anpassung des gesamten Signalpegels
  - Z.B. Einstellen auf Standard-Durchschnittspegel („Normalizing“)
  - bei Verstärkung werden auch unerwünschte Effekte (z.B. Rauschen, Nebengeräusche) mitverstärkt!
- Normalizing:
  - Relativ zu welchem Standard?
  - Bsp.: Abmischen eines Albums:
    - » Auf keinen Fall einzelne Titel auf Standard-Pegel „normalisieren“
    - » Sinnvoller: Normalizing des Gesamtalbums (Charakter der Einzelsongs bleibt erhalten)

## Bearbeitung der Amplitude (2)

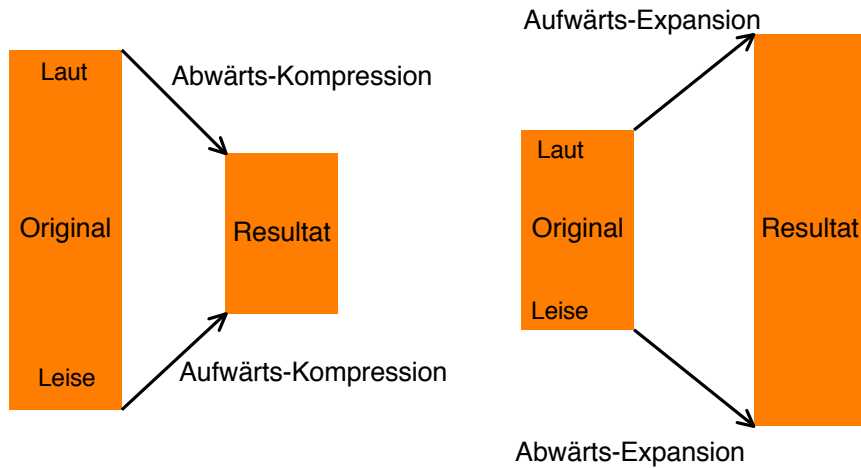
- Bearbeiten der Hüllkurve:
  - Ein- und Ausblenden (*fading*)
  - Typen von Fadern:
    - » linear
    - » logarithmisch
    - » exponentiell
    - » diverse Zwischenformen
- Kompensation von "DC-Offset"
  - Signal genau auf die gewünschte Null-Linie einstellen
  - Unerwünschten "Gleichspannungsanteil" abziehen
- Vorsicht beim Zusammenmischen verschiedener Signale:
  - Gesamtpegel beachten! Signale werden meistens additiv zusammengeführt
  - Digitale Übersteuerung führt zu *Clipping*, welches nachträglich nicht mehr korrigiert werden kann
  - Abhilfe: Einzelne Signale/Spuren vorher entsprechend abschwächen

## Dynamik

- Unterschied zwischen lauten und leisen Passagen
  - Höchster minus kleinster Amplitudenwert in einem Zeitfenster
- Mikrodynamik
  - Kleine Zeitfenster (Sekundenbruchteile)
  - Eigenschaften von Instrumenten
  - Z.B. Schlagzeug hat hohe Mikrodynamik
  - Bearbeitung der Dynamik eines Einzelkanals vor der Abmischung
- Makrodynamik
  - Große Zeitfenster (Sekunden bis Minuten)
  - Eigenschaften von Songs bzw. Szenen
  - Z.B. pianissimo bis fortissimo
  - Bearbeitung der Gesamtdynamik eines längeren Abschnitts
- Probleme mit Dynamik:
  - Übersteuerung bei Wiedergabe
  - Unhörbarkeit durch Hintergrundgeräusche

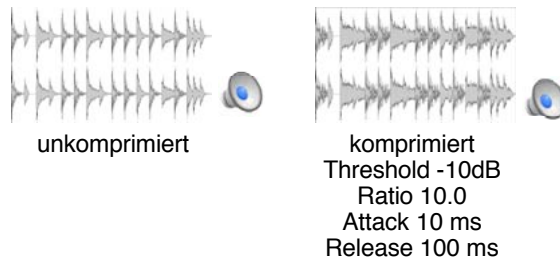


## Varianten der Dynamik-Modifikation



## Bearbeitung der Dynamik (1)

- Kompressor:
  - Schwelle (*threshold*): Amplitudenwert, ab dem die Reduktion einsetzt
  - Faktor (*ratio*): Stärke der Reduktion
  - Einsatz (*attack*) und Ausklingen (*release*): Übergangszeiten
- Beispiel:



## Bearbeitung der Dynamik (2)

- Multiband-Kompressor
  - Aufteilung des Signals in Frequenzbänder
  - Jedes Frequenzband einzeln komprimiert
  - Geeignet zur selektiven Veränderung des Klangbilds
- Expander:
  - Umkehrfunktion zum Kompressor (Dynamikerhöhung)
- Limiter:
  - Schneidet Signal oberhalb der Schwelle auf festen Pegel ab
  - Vermeidet Übersteuerung
- Gate:
  - Schneidet Signal unterhalb des Schwellwertes ab
  - Kann zur Rauschunterdrückung oder zum Ausschalten von Nebengeräuschen dienen

## Bearbeitung des zeitlichen Verlaufs (1)

- Schneiden von Audio-Material
  - Früher wirklich mit der Schere (am Tonband)!
- Heute mit Cut, Copy und Paste im Audio-Editor
  - Möglichst in Pausen schneiden
  - Immer im Nulldurchgang schneiden (sonst Knacken hörbar)
  - Schnitte zu ähnlichem Signal sind relativ problemlos
  - Schnitte von leisem zu lautem Signal sind relativ problemlos
  - Schwierig sind Schnitte innerhalb eines kontinuierlichen Signals
- Überblenden:
  - Bearbeiten der Hüllkurven und Zusammenmischen
  - Kreuzblende (langsam) und Sturzblende (rasch)
- Schleifen (*loop*):
  - Verlängern eines akustischen Ereignisses durch Wiederholen
  - Schnittregeln an der Nahtstelle zu beachten

## Bearbeitung des zeitlichen Verlaufs (2): Resampling

- Andere Wiedergabegeschwindigkeit als Samplingrate
  - Ändert die Zeitdauer und gleichzeitig alle Tonhöhen

- Beispiel:

Original



Resampling \* 0,7



Resampling \* 1,4



- Beispiel: Erzeugung neuer Töne

Kugel auf Teller



1/16 Resampling

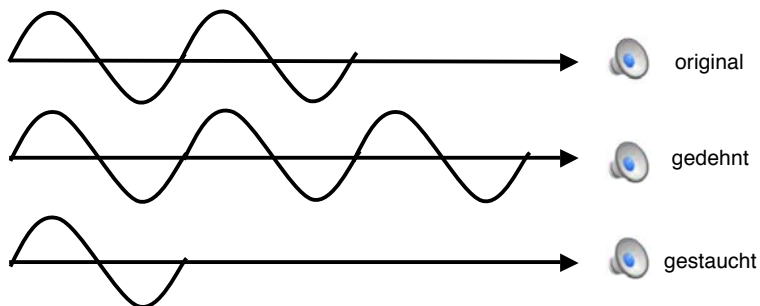


1/64 Resampling



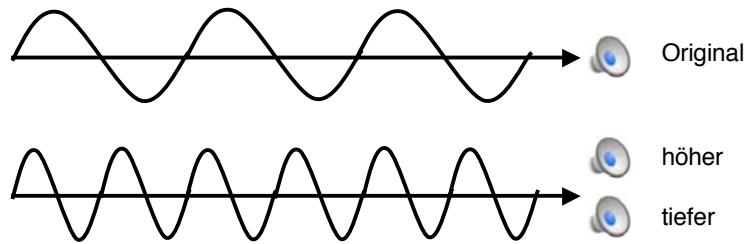
## Bearbeitung des zeitlichen Verlaufs (3): Timestretching

- Zeitkorrektur ohne hörbare Tonhöhenveränderung
  - nur in begrenztem Umfang möglich
  - Idee: Wiederholung kleiner periodischer Abschnitte



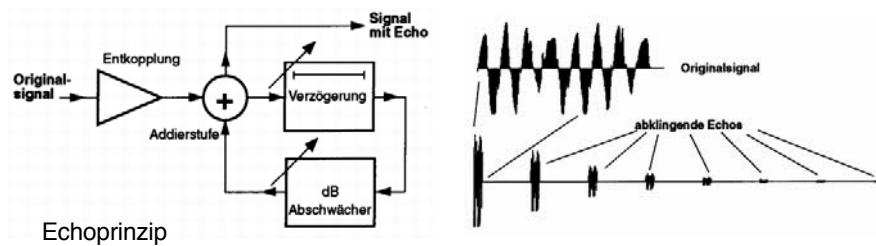
## Bearbeitung des zeitlichen Verlaufs (4): Pitchshifting

- Tonhöhenkorrektur bei gleicher Spieldauer
  - Zusammensetzbar aus Timestretching und Resampling



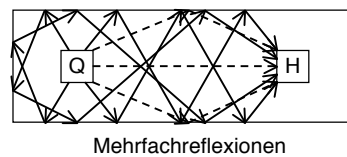
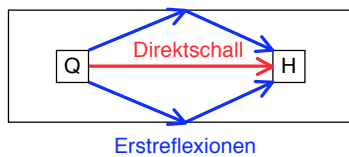
## Raumorientierte Bearbeitung: Echo und Hall

- Echo:
  - Signal einmal verzögert und abgeschwächt zurückgeführt
  - Parameter: Verzögerung, Abschwächung
- Hall:
  - Signal vielfach (unendlich oft) mit verschiedenen Verzögerungszeiten zurückgeführt
  - Halleinstellungen können sehr komplex sein



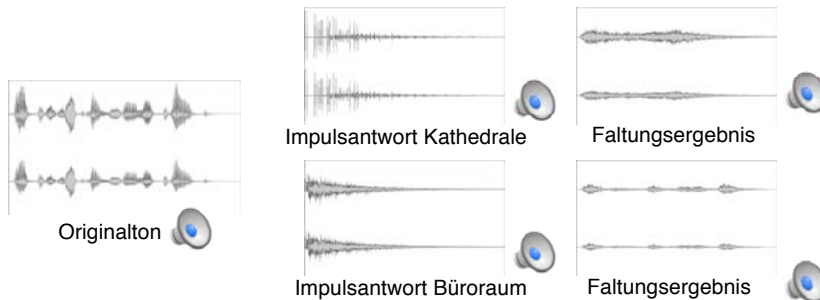
## Schallausbreitung im geschlossenen Raum

- Direktschall:
  - gerade Linie zwischen Quelle und Hörer
  - kürzester Weg
- Erstreflexionen:
  - längerer Weg, längere Laufzeit
  - als unterschiedliches Signal wahrnehmbar (Echos)
- Mehrfachreflexionen:
  - als einheitliches "Hall-" Signal wahrgenommen
  - klingt mit der Zeit ab



## Impulsantwort

- Verhältnis von Direktschall, Erstreflexionen und Nachhall kann experimentell ermittelt werden:
  - Kurzer Impuls bestimmter Frequenz (Klatschen, Schuss)
  - Spektrum des reflektierten Signals beschreibt Übertragungseigenschaften des Raums (*Impulsantwort*)
- Mathematische Berechnung der Raumwirkung:
  - *Faltung* (*convolution*) des Eingangssignals mit Impulsantwort
- Beispiel:



## Phasenorientierte Bearbeitung

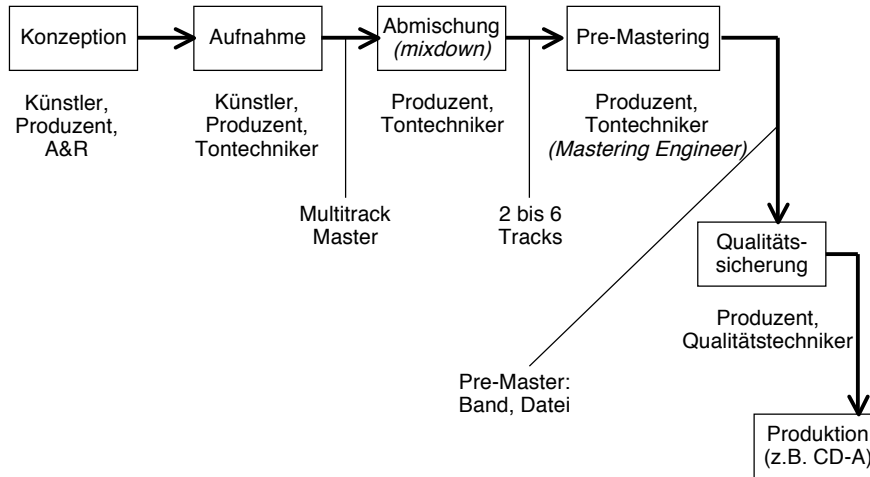
- Sehr kurze Verzögerungen (unter 30 ms) werden als Phasenveränderungen wahrgenommen und beeinflussen den Gesamtklang
- Chorus:
  - Sehr schnelle, minimal in der Höhe veränderte Signalmrückführung
  - Lässt Klang voller erscheinen
- Flanging:
  - Noch kleinere Verzögerungszeit (8 ms)
  - Tonhöhe konstant - Überlagerung mit Originalsignal
  - Feedback: Effektsignal wird an Eingang zurückgeführt
  - Verwendung z.B. bei Gitarrenklängen
- Phasing:
  - ähnlich zu Flanging, aber ohne Feedback
  - synthetischer Klang



## Restauration

- Fehler auf alten Tonträgern:
  - Rauschfehler (*Noise, Hiss*)
  - Clickfehler (*Clicks*)
  - Knistern (*Crackles*)
- **Denoising:**
  - "Fingerprint" (Spektrum) des Rauschens wird bestimmt
  - dann exakt diese Frequenzen ausgefiltert
- **Declicking:**
  - Signallücke durch Interpolation (oder zweiten Stereokanal) ersetzen
- **Decrackling:**
  - Wiederholtes Declicking, auch automatisch ausgeführt

## Produktionsprozess eines Musikalbums



- Aus: Bob Katz: Mastering Audio

## Loudness Wars

- Psychoakustische Tatsache:
  - Spontan wird eine lautere Audio-Darbietung bei sonst gleicher Qualität als „besser“ empfunden
  - Eindruck ändert sich bei längerem Hören!
- Digital vs. Analog:
  - Digitales Audio (CD) tendenziell „leiser“
  - Hochwertiges digitales Audio noch leiser
  - Wegen Ausnutzung des verfügbaren Dynamikbereichs
- Tendenz:
  - Digitale Audio-Aufnahmen werden oft zu hoch angesteuert (sollen lauter klingen)
  - Kompression wird oft zu stark angewandt

## A3. Digitale Tonverarbeitung

A3.1 Akustische Grundlagen der Audiotechnik

A3.2 Analoge Audiotechnik

A3.3 Digitale Audiotechnik

A3.4 Raumklang



Literatur:

M. Warstat, Th. Görne: Studiotechnik, 5. Auflage, Elektor-Verlag 2002

H. Raffaseder: Audiodesign, Fachbuchverlag Leipzig 2002

B. Katz: Mastering Audio – The Art and The Science,  
Focal Press 2002

## Raumklang (1)

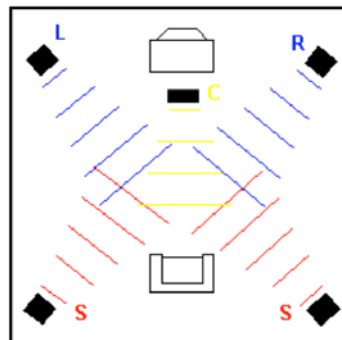
- Stereo:  
Einfachste Art der Klangverteilung mit 2 Kanälen und zwei Boxen.  
Einfacher ist nur noch Mono mit nur einem Kanal.

- Dolby Pro-Logic (Dolby Surround):

4 Kanäle, in den 2 Stereokanälen enkodiert

Bei Wiedergabe 5 Boxen:

- Zwei Frontlautsprecher
- Zwei Surround-Boxen  
(dasselbe Mono-Signal)
- Center-Lautsprecher

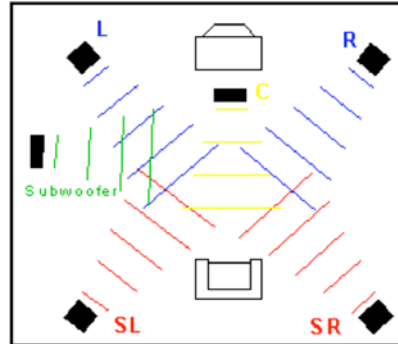




## Raumklang (2)

- 6-Kanalverfahren ("5.1")
  - Frontboxen (links und rechts)
  - 2 Surround-Boxen hinter dem Zuhörer, (separat angesteuert)
  - Center-Speaker
  - Subwoofer.

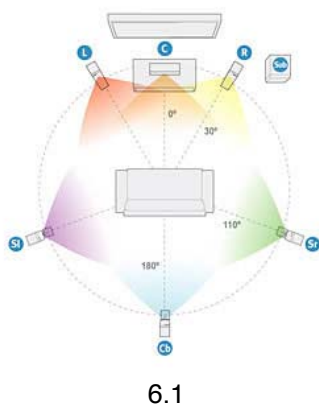
Da das menschliche Ohr tiefe Töne nicht orten kann, ist der Standort des Subwoofers egal.



Siehe auch: <http://www.dolby.com/consumer/technology/>

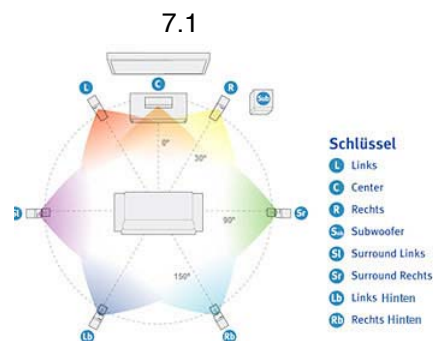
## Raumklang (3)

- 7- und 8-Kanal-Systeme:



### Schlüssel

- L Links
- C Center
- R Rechts
- S Subwoofer
- SL Surround Links
- SR Surround Rechts
- Cb Center Hinten



### Schlüssel

- L Links
- C Center
- R Rechts
- S Subwoofer
- SL Surround Links
- SR Surround Rechts
- Lb Links Hinten
- Rb Rechts Hinten